

# 镀铝卡纸纸张含水量对调湿速率的影响

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2018.03.010

史太川 张雨豪 王 辉

武汉大学

印刷与包装系

湖北 武汉 430072

**摘 要:** 为探索不同相对湿度下镀铝卡纸的纸张含水量与调湿速率之间的关系, 构建镀铝卡纸调湿速率模型。以镀铝卡纸中的素面转移镭射金银卡纸为研究对象, 在不同相对湿度下, 分别测定金银卡纸在吸湿、脱湿过程中各时间点的纸张含水量及平衡含水量, 通过对平衡含水量差与调湿速率进行回归分析并构建调湿速率模型。研究表明: 两种镀铝卡纸的平衡含水量差与调湿速率之间均具有较好的线性相关性, 即选择一阶多项式拟合, 拟合模型较准确; 通过调湿速率模型可对镀铝卡纸纸张含水量实时监控和预测, 为镀铝卡纸在印刷和包装生产中的变形控制提供参考。

**关键词:** 镀铝卡纸; 纸张含水量; 调湿速率; 平衡含水量差

**中图分类号:** TB484.1; TS802.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2018)03-0064-06

## 1 研究背景

金银卡纸等镀铝纸作为一种环保型包装材料, 在包装印刷行业有着较为广泛的应用<sup>[1]</sup>。镀铝纸主要由纸基、铝层和涂层等部分组成, 具有两面性的结构特点, 因此易受温湿度变化的影响而变形<sup>[2-6]</sup>。温湿度的改变会引起纸张含水量(纸张含水量<sup>[7]</sup>是指某一温湿度下一定质量的纸张所含有的水分质量与其干重之比, 亦称湿含量)的变化。纸张含水量过高、过低或不均匀, 均会使其出现紧边、荷叶边或卷曲等现象, 从而影响彩色印刷品的套印精度和印刷效率<sup>[8]</sup>。因此对镀铝卡纸变形控制的研究具有重要意义。

目前, 国内外对纸张变形控制的研究, 主要集中在找寻纸张含水量与温湿度的变化关系, 得到适宜的温湿度范围。刘江浩等<sup>[9]</sup>通过测量和分析不同纸张在不同相对湿度(relative humidity, RH)下的纸张含水量, 得到纸张含水量与相对湿度的变化关系。王辉等<sup>[10]</sup>探究了温湿度对镀铝纸变形的影响, 获得镀铝纸存储的最佳温湿度范围。但由于纸张在一定温湿度下达到平衡水分(平衡水分<sup>[11]</sup>是指一定

温湿度下纸张的水分不再发生变化时的含水量, 亦称平衡含水量)需要一段较长的时间, 故不能准确推算出纸张实时含水量, 因此通过调节温湿度来控制纸张变形存在一定的间接性和滞后性。李汝勤等<sup>[12]</sup>提出了一种纺织材料的吸湿速率模型, 即将纺织材料平衡回潮率(平衡含水量)与当前时刻回潮率(实时含水量)之差作为变量, 构建吸湿速率模型。由于纺织材料与纸张材料在结构上有一定的相似性, 可依据此方法分析纸张调湿速率的影响因素, 并构建纸张调湿速率模型。

由车间经验和相关理论研究可知, 纸张的最佳存储温度为24℃、相对湿度为55%<sup>[10]</sup>, 且由于车间湿度波动范围大于温度波动范围, 相对湿度对镀铝纸变形(或纸张含水量)的影响大于温度对其影响。因此本文针对烟包生产中最易变形的2种转移镀铝卡纸(素面转移镭射金、银卡纸), 在温度为24℃下, 从吸湿、脱湿2个过程探究不同相对湿度下纸张含水量对其调湿速率的影响规律, 并通过回归分析法<sup>[13]</sup>构建调湿速率模型。根据镀铝纸的调湿速率可预测其

收稿日期: 2018-04-08

作者简介: 史太川(1993-), 男, 安徽宿州人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为纸张检测控制和印刷适性,

E-mail: 2430500822@qq.com

任意时刻的含水量, 并结合与镀铝纸伸缩率范围(由套印精度决定)对应的纸张含水量控制范围<sup>[14]</sup>, 使纸张变形问题得到有效控制, 为纸张调湿及生产计划安排提供参考。

## 2 实验

### 2.1 材料和设备

#### 1) 材料

素面转移镭射金卡纸: 纸张定量为 213 g/m<sup>2</sup>, 尺寸为 100 mm × 55 mm, 共 24 张, 购于湖南和锐镭射科技有限公司; 素面转移镭射银卡纸: 纸张定量为 232 g/m<sup>2</sup>, 尺寸为 100 mm × 55 mm, 共 24 张, 购于汕头市嘉信包装材料有限公司。

#### 2) 设备

切纸机, 8014 型, 上海得力文具有限公司; 万分之一分析天平, FA2004 型, 上海力辰邦西仪器科技有限公司; 恒温恒湿箱, THP-408 型, 苏州智河环境试验设备有限公司; 电热恒温鼓风干燥箱, KH-45A 型, 惠州市宏业仪器有限公司。

### 2.2 实验过程

根据文献 [14] 可知, 不同尺寸的同种纸张调湿时间基本相同, 均不超过 2 h。因此为确保测量数据的稳定性, 测量时间设定为 3 h。测量金银卡纸吸湿、脱湿过程相关数据, 具体步骤如下:

1) 吸湿过程。取在较低相对湿度下达到平衡含水量的金银卡纸样各 3 张, 将其置于温度为 24 ℃、相对湿度为 65% 的恒温恒湿箱中, 开始实验后 30 min 内, 每隔 5 min 测量 1 次纸样质量; 30 min 后, 每隔 10 min 测量 1 次纸样质量, 依次记为  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ ... , 直至前后 2 次质量变化小于误差时停止测量。保持恒温恒湿箱的温度不变, 将相对湿度依次调至 70%, 75%, 80%, 再分别取在较低相对湿度下达到平衡含水量的金银卡纸样各 3 张, 在每个相对湿度下重复以上测量步骤。最后, 将全部实验纸样置于温度为 105 ℃ 的烘箱内烘干 2 h, 称量纸样干重, 记为  $m_d$ 。

2) 脱湿过程。取在较高相对湿度下达到平衡含水量的金银卡纸样各 3 张, 置于温度为 24 ℃、相对湿度为 55% 的恒温恒湿箱中, 进行吸湿过程的测量步骤。保持恒温恒湿箱温度不变, 将相对湿度依次调至 50%, 45%, 40%, 再分别取在较高相对湿度下达到平衡含水量的金银卡纸样各 3 张, 每个相对湿度都重复以上测量步骤。最后将全部实验纸样重复如吸湿过

程的烘干操作。

## 3 结果与讨论

### 3.1 平衡含水量差

纸张调湿速率的影响因素主要有环境温湿度、平衡含水量差(即实时含水量与该条件下平衡含水量之差)、纸张吸湿性能及调湿行程(即吸湿或脱湿过程)。本实验主要研究平衡含水量差对调湿速率的影响。图 1 为金卡纸在相对湿度为 80% 时的吸湿和相对湿度为 40% 时的脱湿过程中含水量  $h$  随时间变化的关系曲线。

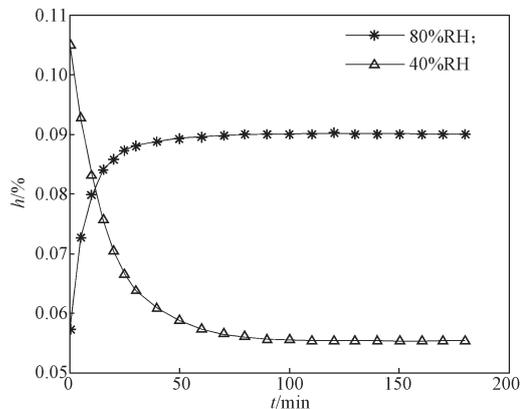


图 1 金卡纸纸张含水量随时间的变化关系

Fig. 1 The change of gold cardboard moisture content with the passing of time

由图 1 可知, 在吸湿与脱湿过程中, 金卡纸纸张含水量均随时间的增加不断接近并最终达到平衡含水量。由此分析可以得出, 在一定温湿度下, 平衡含水量差越小, 纸张越接近水分平衡, 调湿速率也越小, 反之亦然。因此纸张平衡含水量差与调湿速率之间存在一定的函数关系。

### 3.2 数据分析

根据 3.1 中纸张平衡含水量差对调湿速率影响的初步定性分析结果, 对金银卡纸实验数据进行处理与分析, 实验数据分析流程如图 2 所示。

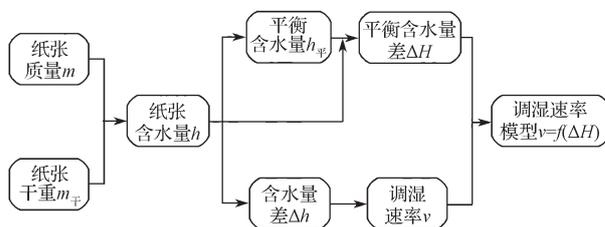


图 2 数据分析流程图

Fig. 2 Flow chart of data analysis

1) 通过测量吸湿或脱湿过程中各时间点纸样质量以及烘干后纸样干重, 计算各时间点纸样的纸张含水量。纸张含水量的计算公式为

$$h=(m_j-m_{\text{干}})/m_{\text{干}} \quad (1)$$

式中:  $h$  为纸张含水量;

$m_j (j=1, 2, 3, \dots)$  为第  $j$  个时间点纸样的质量;

$m_{\text{干}}$  为纸样干重。

2) 在各湿度下所得的纸张含水量数据中, 以最后 3 个时间点的纸张含水量的均值作为平衡含的计算水量, 进而计算各时间点平衡含水量差。平衡含水量差公式为

$$\Delta H=h_{\text{平}}-h_0 \quad (2)$$

式中:  $\Delta H$  为平衡含水量差;

$h_{\text{平}}$  为平衡含水量。

3) 通过各时间点纸张含水量计算相邻时间点纸样含水量差, 进而计算各时段纸样平均调湿速率, 并将其视作为各时段中前一时间点的瞬态调湿速率。调湿速率的计算公式为

$$v=\Delta h/\Delta t \approx dh/dt \quad (3)$$

式中:  $v$  为调湿速率;

$\Delta h$  为相邻时间点含水量差;

$\Delta t$  为相邻时间差。

4) 根据步骤 2) 和 3) 分别得到平衡含水量差和调湿速率数据, 从而构建调湿速率模型。该模型可以表示为

$$v=dh/dt=f(\Delta H) \quad (4)$$

### 3.3 调湿速率模型

回归分析法<sup>[1]</sup>指利用数据统计原理, 对大量统计数据进行数学处理, 并确定一个因变量与一个或多个自变量的相关关系, 建立一个相关性较好的回归方程, 并加以外推, 用于预测今后因变量变化的分析方法。由于本实验中研究的是因变量调湿速率与单一自变量平衡含水量差之间的函数关系, 因此采用一元回归分析, 进行调湿速率模型的拟合。

#### 3.3.1 拟合回归方程

分别对金银卡纸在不同相对湿度时吸脱湿过程的平衡含水量差与调湿速率数据进行多项式拟合, 得到的调湿速率模型函数表达式为

$$v(\Delta H)=\sum_{i=0}^n P_i \Delta H^i \quad (5)$$

式中:  $P_i (i=1, 2, \dots, n)$  为回归系数;

$n$  为多项式的最高阶次。

#### 3.3.2 拟合优度检验

将金银卡纸的各组平衡含水量差与调湿速率数据用 Matlab 进行拟合, 经尝试, 当取  $n=1$  时, 即可得到较满意的拟合优度, 亦即金银卡纸的平衡含水量差与调湿速率之间具有较好的线性相关性, 具体结果如表 1~2 所示。由表 1~2 可知, 对于金银卡纸的调湿速率函数模型的多项式拟合, 其和方差 (the sum of squares due to error, SSE) 与均方根 (root mean squared error, RMSE) 均接近于 0, 说明拟合结果与原始数据契合度较高, 拟合结果较好; 可决系数 (R-square) 和校正后的可决系数 (adjusted R-square) 均接近于 1, 说明拟合模型选择较准确, 数据预测较成功。

表 1 金卡纸调湿速率模型拟合优度

Table 1 Fitting goodness of humidify velocity model of gold cardboard

操作	相对湿度 / %	SSE	R-square	Adjusted R-square	RMSE
吸湿	80	7.71E-08	0.992 6	0.992 2	6.37E-05
	75	2.73E-08	0.996 0	0.995 8	3.79E-05
	70	1.48E-08	0.996 5	0.996 3	2.79E-05
	65	2.55E-09	0.999 1	0.999 1	1.16E-05
	55	3.95E-09	0.999 0	0.998 9	1.44E-05
脱湿	50	8.90E-09	0.998 3	0.998 2	2.16E-05
	45	1.37E-08	0.998 1	0.998 0	2.68E-05
	40	2.91E-08	0.997 1	0.997 0	3.91E-05

表 2 银卡纸调湿速率模型拟合优度

Table 2 Fitting goodness of humidify velocity model of silver cardboard

操作	相对湿度 / %	SSE	R-square	Adjusted R-square	RMSE
吸湿	80	1.23E-07	0.982 8	0.981 9	8.04E-05
	75	4.11E-08	0.990 8	0.990 4	4.65E-05
	70	8.00E-09	0.997 5	0.997 3	2.05E-05
	65	4.51E-09	0.997 7	0.997 6	1.54E-05
	55	1.09E-08	0.997 4	0.997 2	2.39E-05
脱湿	50	9.94E-09	0.998 1	0.998 0	2.29E-05
	45	2.53E-08	0.996 7	0.996 5	3.65E-05
	40	4.40E-08	0.995 8	0.995 6	4.81E-05

#### 3.3.3 调湿速率模型回归系数

将多项式的最高阶次  $n=1$  代入式 (5), 得到金银卡纸在不同相对湿度时吸脱湿过程的调湿速率模型回归系数, 结果如表 3 所示。由表 3 可知, 金银卡纸脱湿过程的调湿速率模型  $P_1$  值均随相对湿度的增大而增大,  $P_0$  值均为接近于 0 的正值; 金银卡纸吸湿过程的调湿速率模型  $P_1$  值均随相对湿度的增大而

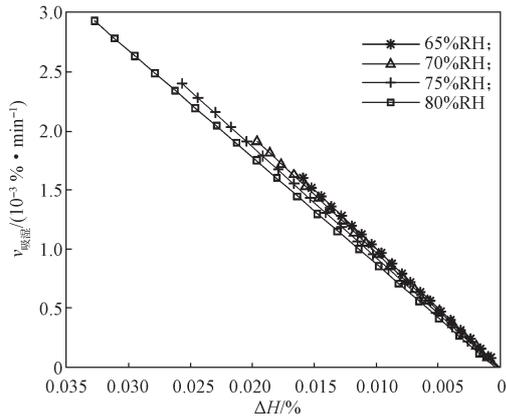
减小,  $P_0$  值均为接近于 0 的负值。

表 3 调湿速率模型回归系数

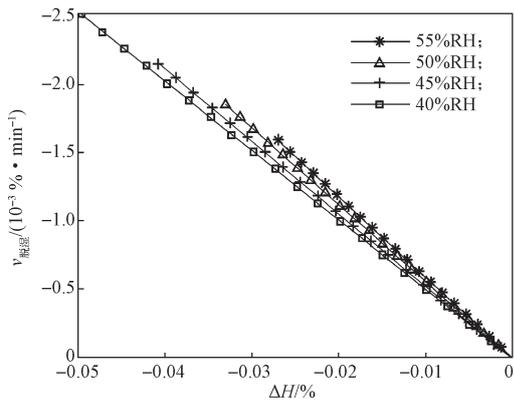
操作	相对湿度 / %	回归系数			
		金卡纸		银卡纸	
		$P_1$	$P_0$	$P_1$	$P_0$
脱湿	40	0.050 9	1.08E-05	0.052 5	1.05E-05
	45	0.053 2	1.33E-05	0.055 6	1.28E-06
	50	0.056 4	9.85E-06	0.063 0	5.11E-06
	55	0.059 1	5.88E-06	0.067 2	9.59E-06
吸湿	65	0.100 4	-3.83E-06	0.094 4	-9.07E-06
	70	0.098 3	-1.36E-05	0.086 3	-8.25E-06
	75	0.094 5	-2.15E-05	0.083 0	-2.23E-05
	80	0.090 7	-3.51E-05	0.081 6	-4.08E-05

### 3.4 平衡含水量差与调湿速率关系分析

将金银卡纸在不同相对湿度时吸湿脱湿过程的调湿速率函数模型进行直线拟合, 如图 3~4 所示。由图可知, 两种镀铝卡纸的平衡含水量差与调湿速率的关系变化趋势较为相似。



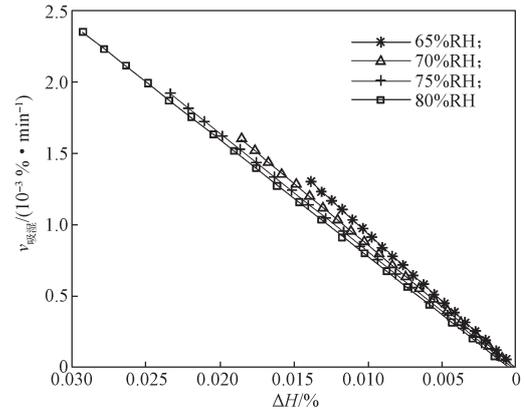
a) 吸湿



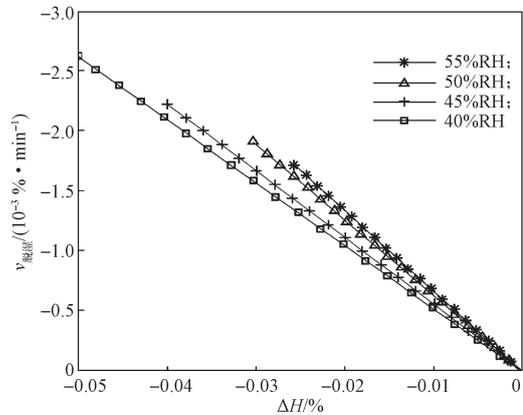
b) 脱湿

图 3 金卡纸调湿速率随平衡含水量差的变化关系

Fig. 3 The change of gold cardboard humidify velocity with equilibrium moisture content difference



a) 吸湿



b) 脱湿

图 4 银卡纸调湿速率随平衡含水量差的变化关系

Fig. 4 The change of silver cardboard humidify velocity with equilibrium moisture content difference

图 3a 中, 在 4 个不同相对湿度下, 金卡纸在吸湿过程中的平衡含水量差与吸湿速率呈线性关系, 变化趋势较为一致, 吸湿速率均随着平衡含水量差的减小而降低, 当平衡含水量差为 0 时, 吸湿速率也降为 0。由于各相对湿度下纸张的初始含水量相当, 且纸张平衡含水量与相对湿度正相关, 因此, 相对湿度较高时, 初始平衡含水量差也较大。4 条直线的斜率 (吸湿速率降低的速度) 与相对湿度负相关, 斜率随相对湿度的增大而减小。当平衡含水量差相同时, 吸湿速率随着相对湿度的增大而降低。原因是纸张平衡含水量与相对湿度正相关, 若平衡含水量差相同, 则低相对湿度下纸张实时含水量较低, 高相对湿度下纸张实时含水量较高, 低含水量纸张的吸湿性能较高含水量纸张好。

图 3b 中, 在 4 个不同相对湿度下, 金卡纸在脱湿过程中的平衡含水量差与脱湿速率呈线性关系, 变化趋势亦较为一致, 脱湿速率绝对值均随着平衡含水

量差绝对值的减小而降低,当平衡含水量差为0时,脱湿速率也降为0。由于各相对湿度下纸张的初始含水量相当,且纸张平衡含水量与相对湿度正相关,因此,相对湿度较低时,初始平衡含水量差绝对值也较大。4条直线的斜率(脱湿速率绝对值降低的速度)与相对湿度正相关,斜率随相对湿度的增大而增大。当平衡含水量差相同时,脱湿速率绝对值随着相对湿度的增大而增大。原因与吸湿过程相反,脱湿过程高含水量纸张的脱湿性能较低含水量纸张好。

图4中,在不同相对湿度下,银卡纸吸脱湿过程中的平衡含水量差与调湿速率呈线性关系,变化趋势与金卡纸类似,但银卡纸吸湿过程的4条关系直线斜率比金卡纸吸湿过程的4条对应关系直线的斜率略小,即在相同的相对湿度下,银卡纸吸湿速率降低的速度比金卡纸稍慢;银卡纸脱湿过程的4条关系直线比金卡纸脱湿过程的4条对应关系直线的斜率略大,即在相同的相对湿度下,银卡纸脱湿速率绝对值降低的速度比金卡纸稍快。

### 3.5 调湿速率模型应用

通过纸张调湿速率模型可推导出实时的纸张含水量计算公式。其公式为:

$$h = h_0 + \int v dt \quad (6)$$

式中:  $h_0$  为初始含水量。

若已知标准存储温度下,某一相对湿度的实时纸张含水量(即视为  $h_0$ )与平衡含水量差,通过模型获得调湿速率,再根据实时的纸张含水量计算公式既可以预测任意时刻的纸张含水量并推算出纸张伸缩率,也可以预测纸张在当前纸张含水量下到达含水量控制范围<sup>[4]</sup>的边界值时所需的时间。从而实现对纸张含水量的实时监控和趋势预测,将纸张变形的控制由环境温湿度标准回归到纸张含水量标准上。

## 4 结语

针对金银卡纸吸湿与脱湿过程,在标准存储温度24℃下分别建立不同相对湿度时平衡含水量差与调湿速率的关系模型。经相关性检验,模型拟合准确,且该模型具有以下优点与不足:

1) 使用纸张含水量控制纸张变形更加直观、准确。即使环境湿度超出标准范围时,只要纸张含水量依然在标准范围内,就不会出现纸张变形问题。

2) 可为纸张调湿等生产过程提供依据和参考。

若纸张含水量不在标准范围内,可根据此方法对纸张进行调湿处理。

3) 本文仅针对金银卡纸2种镀铝纸进行标准温度下部分相对湿度的实验,实验样本有限。后期可对相对湿度进行更多梯度的实验,同时还可以对温度及纸样种类进行实验,以期将温湿度及纸张吸湿性能3个变量引入模型,进一步泛化模型的适用性。

### 参考文献:

- [1] 楚高利,成刚虎.真空镀铝纸的制作及胶印工艺研究[J].包装工程,2007,28(5):179-181.  
CHU Gaoli, CHEN Ganghu. Research on Production and Offset Printing Technology of Aluminized Paper[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(5): 179-181.
- [2] 陈敬浩,陈港,张宏伟,等.环保型真空镀铝纸的生产及其降解性能评价[J].造纸科学与技术,2005,24(1):13-15.  
CHEN Jinghao, CHEN Gang, ZHANG Hongwei, et al. Production of Environmental Protection Type Vacuum Aluminium-Plating Paper and Its Degradation Property Evaluation[J]. Paper Science & Technology, 2005, 24(1): 13-15.
- [3] 王雪芳,黄文静.金银卡纸的制造及其印刷适性[J].印刷质量与标准化,2009(3):60-62.  
WANG Xuefang, HUANG Wenjing. Manufacture of Gold and Silver Cardboard and Its Printing Suitability[J]. Printing Quality & Standardization, 2009(3): 60-62.
- [4] 赵欢,张霞.镭射纸印品表面油墨爆色问题研究[J].包装学报,2016,8(4):40-44.  
ZHAO Huan, ZHANG Xia. Research on Surface Color Explosive in Laser Paper Printing[J]. Packaging Journal, 2016, 8(4): 40-44.
- [5] 余振华,郑迪生,曾晓鹰,等.电子束固化技术在真空镀铝纸上的应用[J].热固性树脂,2014,29(3):48-52.  
YU Zhenhua, ZHENG Disheng, ZENG Xiaoying, et al. Application of Electron Beam Curing Technology in Aluminum Plating Paper[J]. Thermosetting Resin, 2014, 29(3): 48-52.
- [6] 丁莹琨.金银及镭射卡纸印刷色的颜色度量方法研究[D].北京:北京印刷学院,2013.  
DING Yingkun. Study on the Color Measurement Methods of Printed Colors on the Gold and Silver Paper and the Laser Paper[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2013.
- [7] 干英俊.浅析影响纸张含水量的主要因素[J].印刷杂

- 志, 2001(2): 48-49.  
GAN Yingjun. Analysis of the Main Factors Affecting the Water Content of Paper[J]. Printing Field, 2001(2): 48-49.
- [8] 王爱华. 纸张含水量对印刷效果的影响及其控制 [J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2002, 2(2): 21-22.  
WANG Aihua. Influence of Moisture Content of Paper on Printing Effect[J]. Journal of Hunan Industry Polytechnic, 2002, 2(2): 21-22.
- [9] 刘江浩, 高少红, 王 岩, 等. 环境湿度对纸张含水量及纸张力学性能的影响 [J]. 北京印刷学院学报, 2013, 21(4): 5-8.  
LIU Jianghao, GAO Shaohong, WANG Yan, et al. Effect of Environmental Humidity on the Mechanical Behavior of Paper and Paper Moisture Content[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2013, 21(4): 5-8.
- [10] 王 辉, 张雨豪, 万晓霞. 环境温湿度对镀铝纸变形的影响 [J]. 包装工程, 2018, 39(5): 115-120.  
WANG Hui, ZHANG Yuhao, WAN Xiaoxia. The Influence of Environment Temperature and Humidity on Deformation of Aluminized Paper[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(5): 115-120.
- [11] 齐晓堃. 印刷材料及适性 [M]. 北京: 印刷工业出版社, 2008: 3-8.  
QI Xiaokun. Printing Materials and Its Printability[M]. Beijing: Printing Industry Press, 2008: 3-8.
- [12] 李汝勤, 王 越. 纺织材料吸湿速率测试研究 [J]. 纺织学报, 1991, 12(6): 283-285.  
LI Ruqin, WANG Yue. Research on Moisture Absorption Velocity Test for Textile Materials[J]. Journal of Textile Research, 1991, 12(6): 283-285.
- [13] 盛 骤. 概率论与数理统计 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 244-260.  
SHENG Zhou. Probability Theory and Mathematical Statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 244-260.

## Effects of Moisture Content of Aluminized Paper on Humidify Velocity

SHI Taichuan, ZHANG Yuhao, WANG Hui

( School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430072, China )

**Abstract:** In order to explore the relationship between moisture content and humidify velocity of aluminized paper under different relative humidity, and build the model of humidify velocity of aluminized paper, the gold and silver cardboard aluminized paper was studied. The moisture content at each time point and equilibrium moisture content were measured in the process of moisture absorption and dehumidification under each given relative humidity, and the model of humidify velocity was built by the regression analysis of equilibrium moisture content difference and humidify velocity. The research results showed that, there existed good linear relationship between equilibrium moisture content difference and humidify velocity of the two aluminized paper, i.e., the fitting model was more accurate when the first order polynomial fitting was selected. The moisture content of aluminized paper could be monitored and predicted at any point in time by the model, which could provide guidance for control of aluminized paper deformation in printing and packaging production.

**Keywords:** aluminized paper; moisture content; humidify velocity; equilibrium moisture content difference